

# Waterwerende behandelingen op beton

Luc Schueremans,

Departement Burgerlijke Bouwkunde, KULeuven, Kasteelpark Arenberg 40, 3001 Heverlee

[luc.schueremans@bwk.kuleuven.be](mailto:luc.schueremans@bwk.kuleuven.be)

## Samenvatting

Deze bijdrage richt zich voornamelijk op gewapend betonnen structuren, of de “monumenten van de toekomst” en het nut van een waterwerende behandeling voor dit type van constructies. In een eerste luik ligt de nadruk op het belang van preventieve maatregelen in het behoud van (gewapend) betonnen structuren. Vanuit de belangrijkste schadeoorzaken, schademechanismen en transportmodellen wordt nagegaan in welke mate een waterwerende behandeling tot nut kan zijn. In een tweede luik wordt het gebruik, het nut en de impact van een waterwerende behandeling als preventieve maatregel geïllustreerd voor de kaaimuur te Zeebrugge. Het gaat hier niet om een historisch gebouw en aldus ligt de nadruk voornamelijk op de methodiek die wordt toegepast bij dit type van monumentale betonconstructies, die uiteraard ook minstens van toepassing zijn bij gewapend betonnen historische gebouwen en monumenten. De effectiviteit van deze preventieve maatregel wordt getoetst op basis van herhaaldelijke meetcampagnes in situ en een numerieke simulatie van het effect ervan op de levensduur van de constructie.

**Sleutelwoorden:** preventieve waterwerende behandeling, monitoring, beton behouden, levensduur

## Inleiding

### Schadeprocessen bij gewapend beton

Het is belangrijk vooraf in kaart te brengen welke schade(parameters) of schade-evoluties relevant zijn voor (gewapend) beton, om nadien de effectiviteit van waterwerende behandelingen in dat opzicht te beoordelen.

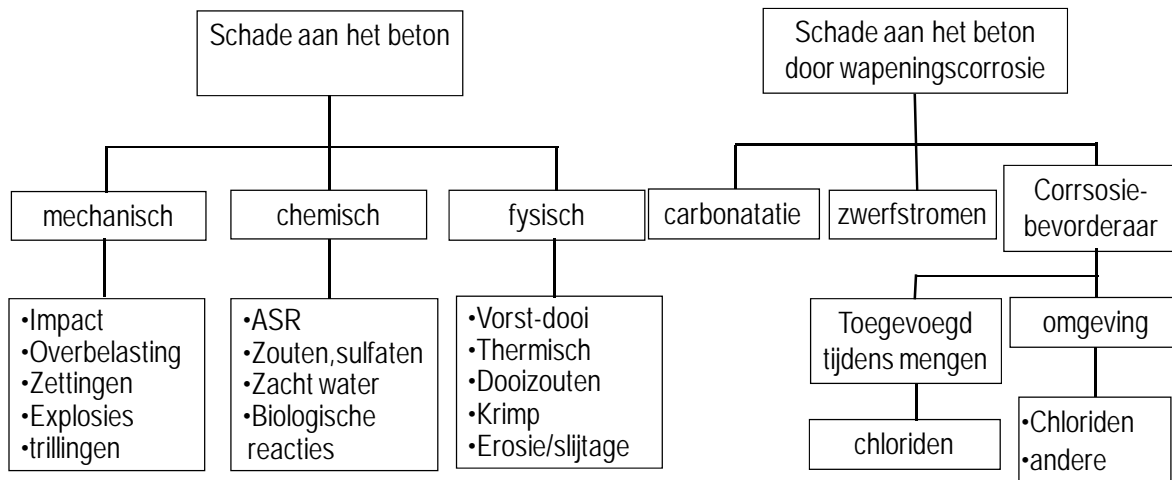
De meest optredende gebreken bij gewapend betonnen constructies kunnen in een aantal categorieën ondergebracht worden. Vaak gebeurt het dat verschillende categorieën tegelijk optreden, aanwezig zijn op verschillende plaatsen in de structuur of elkaar in de hand werken [1-3]. Enerzijds kan het beton zelf onderhevig zijn aan schade door velerlei oorzaken:

- mechanisch: impact- of overbelasting, (differentiële) zettingen, explosies, trillingen;
- chemisch: AAR (alkali-aggregaat-reactie, zie ook bijlage), de inwerking van agressieve stoffen en biologische reacties (biogene zwavelzuur aantasting);
- fysisch: vorstdooi cycli, thermische werking, dooizouten, krimp, erosie/slijtage.

Anderzijds kan de schade aan het beton veroorzaakt worden door wapeningscorrosie (zie ook bijlage). Deze wordt beïnvloed door:

- aanwezigheid van vocht (door slecht functionerende waterafvoer, conceptiefouten, of andere);
- carbonatatie (zie ook bijlage);
- zwerfstromen;
- corrosiebevorderaars: chloriden initieel toegevoegd bij het mengsel, of uit de omgeving die aanleiding geven tot putcorrosie (zie ook bijlage).

Figuur 1 geeft dit schematisch weer.



**Figuur 1:** Schademechanismen beton (overgenomen uit [3] en NBN ENV 1504-9).

## Transportmodellen - schademechanismen

De schademechanismen bij beton waarop een waterwerende behandeling impact kan hebben, zijn gerelateerd aan transport van waterdamp, vloeibaar water, CO<sub>2</sub> en zouten doorheen de beschermende laag: de betondekking. Wanneer een preventieve bescherming van het beton wordt beoogd, zijn het deze parameters waarop de preventieve bescherming kan inspelen om de levensduur van het (gewapend) beton te beïnvloeden.

Het modelleren van het transport is een complexe aangelegenheid [4] maar voor een aantal componenten worden vaak eenvoudige modellen gehanteerd die bruikbaar blijken in de praktijk. Het transport van CO<sub>2</sub> en chloriden doorheen de betondekking is een diffusiegestuurd proces.

Zo kan de diepte van het **carbonatatiefront** worden berekend door:

$$x_c = A\sqrt{t} \quad (1)$$

Hierin is:  $x_c$ : de diepte van het carbonatatiefront,  $A$ : de diffusiecoëfficiënt voor CO<sub>2</sub> in het beton,  $t$ : de tijd.

Het **transport van chloriden** kan vereenvoudigd worden beschreven aan de hand van:

$$C_i(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2)$$

Hierin is:

- $C_i(x, t)$ : de chloridenconcentratie op een diepte  $x$  en tijdstip  $t$ ;
- $C_0$ : de initiële chloridenconcentratie in het beton;
- $C_s$ : de chloridenbelasting aan het oppervlak;
- $D$ : de diffusiecoëfficiënt voor Cl<sup>-</sup>-ionen in het beton.

Het gunstig effect van bijkomende betondekking en de kwaliteit ervan zijn hierbij duidelijk. Een grotere en/of betere kwaliteit van de betondekking (lagere diffusiecoëfficiënt  $D$ ) verhogen aanzienlijk de tijd die vereist is voor schadelijke elementen om de wapening te bereiken. De kwaliteit van de betondekking (waaronder de porositeit) beïnvloedt de diffusiecoëfficiënten  $A$  en  $D$  en daarmee rechtstreeks het beschermende effect op het achterliggend wapeningsstaal.

De duurzaamheid van gewapend beton wordt bepaald door de weerstand tegen diverse chemische en fysische processen. In normaal beton verkeert de wapening in een alkalisch milieu met een pH van 12.5 tot 13 en vormt er zich een beschermende patinalaag op het staaloppervlak. Deze laag met een dikte van nagenoeg 10 nm, voorkomt het corrosieproces.

Onder invloed echter van het atmosferische  $\text{CO}_2$  wordt de vrije kalk in het beton gebonden, waarbij het alkalisch milieu verloren gaat. De pH van het beton daalt hierbij tot waarden van 8.5 tot 9 (carbonatatie, zie ook bijlage). Wanneer de carbonatatediepte gelijk is aan de betondekking, kan de wapening roesten.

Voor corrosie is de aanwezigheid van vocht en toetreding van zuurstof uit de lucht nodig, zie ook bijlage. Voor beton in de buitenlucht is voldoende vocht aanwezig om dit proces te onderhouden. De zuurstof kan tevens doorheen de betondekking toetreden.

Chloorionen afkomstig van contaminanten (maritiem klimaat, zwembaden, dooizouten), reageren slechts weinig met de vaste fase van het beton en zijn in de poriën voornamelijk terug te vinden als vrije chloriden. Door concentratieverschillen van chloriden aan het oppervlak en dieper in het beton, zullen de chloriden geleidelijk aan migreren naar de wapening toe. Wanneer vrije chloriden in het beton aanwezig zijn, kan de corrosie ook in alkalisch milieu doorgaan. Deze agressieve stoffen in het beton geven aanleiding tot een snel verlopende corrosie, putcorrosie genoemd.

De reactie van alkalis met reactieve aggregaten (AAR) is, in tegenstelling tot voorgaande, geen oppervlaktereactie. Het proces speelt zich af in de betonmassa. De alkalis ( $\text{Na}^+$  en  $\text{K}^+$ , komen in het cement voor onder de vorm van oxiden) reageren met de reactieve bestanddelen van het aggregaat wanneer hun gehalte een zekere grenswaarde overschrijdt. De gevormde alkali-silikaatgel zwelt door opname van water ( $\text{CaSiO}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ ) en veroorzaakt expansieve krachten die het beton van binnenuit stukdrukken. De mate waarin deze reactie optreedt, wordt mede bepaald door de vochtigheid van het beton. Ook hier is de aanwezigheid van water in het beton een bezwarende parameter.

Het zijn telkens de expansieve reacties (vorming van corrosieproducten, gel-vorming) die trekspanningen in het beton veroorzaken. Overschrijden deze trekspanningen de treksterkte van het beton, dan zal de betondekking barsten en scheuren gaan vertonen. In de gevormde barsten en scheuren verloopt de carbonatatie van het beton onder invloed van  $\text{CO}_2$  sneller door lokale blootstelling aan de omgevingslucht. Zo ook zal de toevloed van water versneld plaatsvinden. Het beschermend effect van de betondekking gaat verloren waardoor het verval nog versnelt. Finaal zal de betondekking worden afgeduwd, waardoor de wapening volledig is blootgesteld zonder bijkomende bescherming.

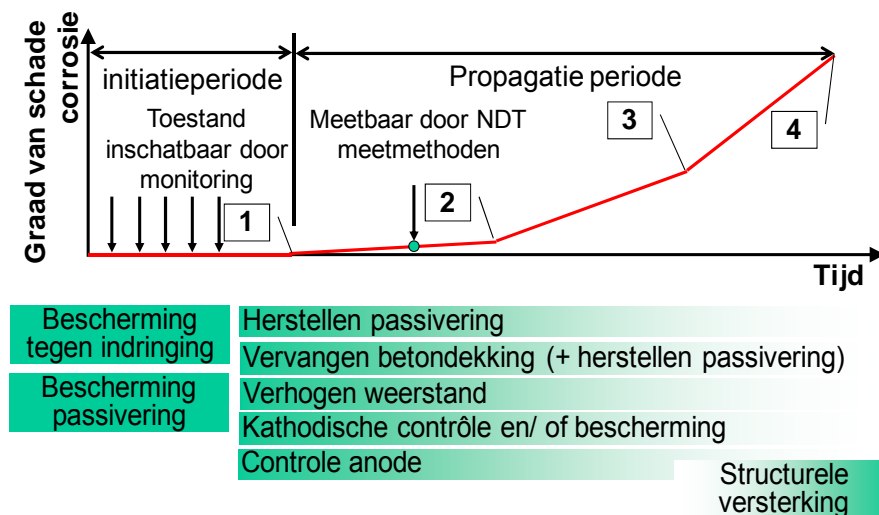
De schade-evolutie wordt schematisch weergegeven in Figuur 2. In functie van de aanwezige schade, zijn tevens de meest courante consolidatie- en herstellingsmaatregelen in kaart gebracht. Omdat de schade versneld zal optreden en gepaard gaan met steeds grotere consequenties en dus kosten, is het van cruciaal belang tijdig in te grijpen, en verdere gevolgschade niet af te wachten.

Hieronder worden een aantal mijlpalen in het schadeproces aangegeven (initiatieperiode tot depassivatie van de betonwapening en propagatieperiode tot finaal structureel bezwijken van de structuur), onder de vorm van het bereiken van grenzen (grenstoestandsfuncties):

1. depassivatie van de wapening;
2. scheurvorming;
3. afstoting van de betonwapening;
4. structureel falen door gebrek aan hechting met, of door reductie van de dwarsdoorsnede van de wapening.

De impact van een waterwerende behandeling situeert zich binnen het luik “bescherming tegen indringing” en is daarmee per definitie een preventieve maatregel, toe te passen voorafgaand aan

het optreden van schade. In geval van historische gebouwen en monumenten, zal dus moeten overwogen worden in hoeverre het waterwerend middel als preventieve maatregel ter voorkoming van (verdere evolutie van) schade kan worden ingezet.



**Figuur 2:** Schade-evolutie in gewapend betonnen constructies [3]

## Productie, toepassing en werkingsmechanisme van silicone waterwerende middelen

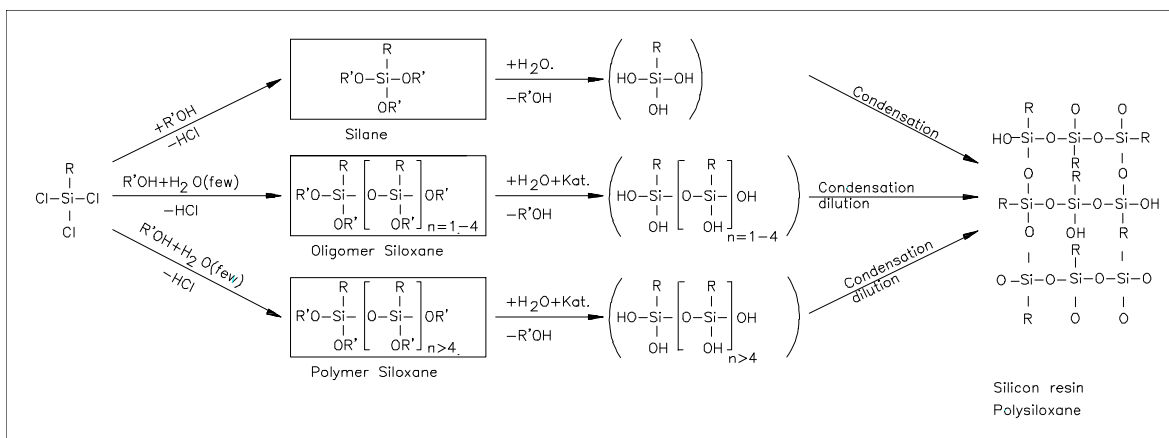
Verschillende generaties van producten werden ontwikkeld om de agressieve impact van de omgeving op beton terug te dringen. Goede resultaten werden verkregen met waterwerende behandelingen.

Verschillende families van deze waterwerende producten worden al jaren gebruikt in de bouwindustrie. De meeste zijn silicone verbindingen onder de vorm van silanen en siloxane verbindingen [5]. Silanen zijn monomere verbindingen en komen vaak voor onder de vorm van een alkyltrialkoxysilaan. Siloxane verbindingen zijn verkrijgbaar onder de vorm van een oligomere of polymere verbindingen.

Het uitgangspunt voor alle silicium-organische componenten is een alkyltrichloorsilaan, Figuur 3, links. In Figuur 3 is de hydrophobe alkylgroep voorgesteld door het symbool R (methyl-, ethyl-, propyl-, butyl-, pentyl- tot octylgroep). Door omzetting van dit silaan met een alcohol ( $+R'-OH$ ), wordt het overeenstemmende alkyltrialkoxysilaan gevormd, waarbij waterstofchloride ( $-HCl$ ) wordt afgescheiden. De reactie met alcohol levert een oligomeer of polymeer siloxaan op, afhankelijk van de hoeveelheid water aanwezig ( $H_2O$ ). De 2 laatste producten verschillen dan enkel ook in de graad van polymerisatie (Figuur 3).

Wanneer deze producten worden aangebracht, op een vochtige ondergrond, zal de hydrofiele alkoxygroep ( $OR'$ ) reageren met het aanwezige water ( $+H_2O$ ) waardoor een alcohol ( $-R'OH$ ) wordt gevormd dat verdampt. Voor de laagmoleculaire silanen gaat deze hydrolyse voldoende snel in tegenstelling tot de oligomere en polymere siloxanen waaraan een katalysator wordt toegevoegd (zoals metaaloxides, zoals bv.: tetrabutyltitanaat of dibutyltindilauraat).

Op de betonondergrond vindt een polycondensatiereactie plaats, waarbij chemische bindingen worden gevormd met de betonondergrond ( $-Si-R$ ). Op die manier ontstaat een 3-dimensioneel netwerk, dat chemisch gebonden is met het betonoppervlak. Deze chemische binding staat mee garant voor de duurzaamheid van dit type van producten.



**Figuur 3:** chemische stappen in de vorming van siliciumorganische moleculen

## Effectiviteit van waterwerende behandelingen

De waterwerende behandeling vermindert het transport van vloeibaar water en de zouten die in het water opgelost zijn. Opgelet: daar waar de indringing van water in vloeibare vorm in zijn geheel maximaal zou moeten worden tegengehouden, zal de waterwerende behandeling het transport van waterdamp slechts in beperkte mate beïnvloeden.

Het waterwerend product zou voldoende diep in de betonondergrond moeten indringen, om een lange termijn duurzaamheid te kunnen garanderen. Uiteraard is een voldoende indringdiepte vereist om een effectieve bescherming te kunnen vormen tegen chloriden indringing en aldus de ermee gepaard gaande putcorrosie.

Het indringvermogen van de waterwerende behandeling hangt af van:

- de aan het oppervlak aangebrachte hoeveelheid en de mate waarin deze hoeveelheid aanwezig is (en voldoende lange tijd blijft) als bronmateriaal voor de verdere indringing in de ondergrond (voortijdige verdamping aan het oppervlak is te vermijden);
- de grootte van de actieve siliciumorganische moleculen;
- het type oplosmiddel dat eventueel gebruikt wordt.

Uiteraard beïnvloedt ook de ondergrond het penetratievermogen van het waterwerende product, namelijk:

- de porositeit en poriënverdeling die de permeabiliteit bepalen;
- het vochtgehalte.

Zo zullen bijvoorbeeld de silanen met hun laag moleculair gewicht dieper indringen dan hoogmoleculaire siloxanen. Daarentegen zijn ze veel vluchtiger en bestaat het gevaar dat veel van de actieve componenten verloren gaat door verdamping.

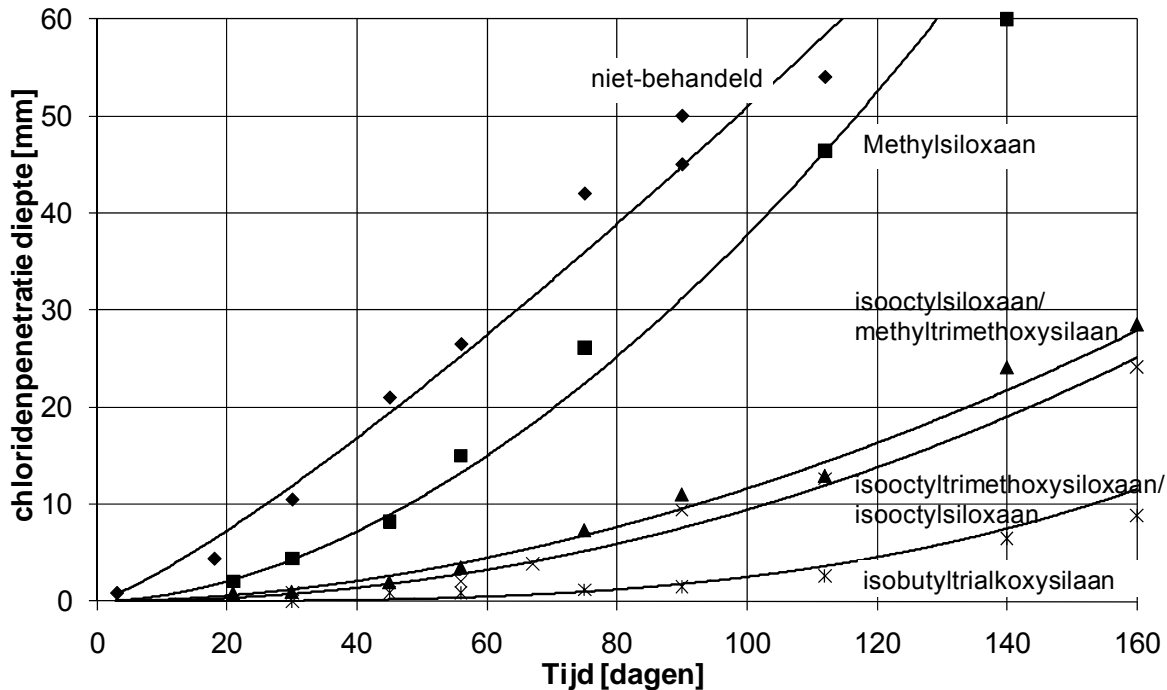
Silanen worden dan meestal ook toegepast in grote concentraties actieve stoffen (40-100%), zodat er na de polymerisatie nog voldoende product in de ondergrond achterblijft. Gelvormige producten moeten ervoor zorgen dat een te snelle afloop en verdamping aan het oppervlak wordt voorkomen. De indringdiepte van de hoogmoleculaire polysiloxanen moet vooraf goed worden onderzocht opdat een voldoende effectiviteit kan worden gegarandeerd.

Een waterwerend product heeft een positieve impact op schade fenomenen die gerelateerd zijn aan waterindringing in de ondergrond:

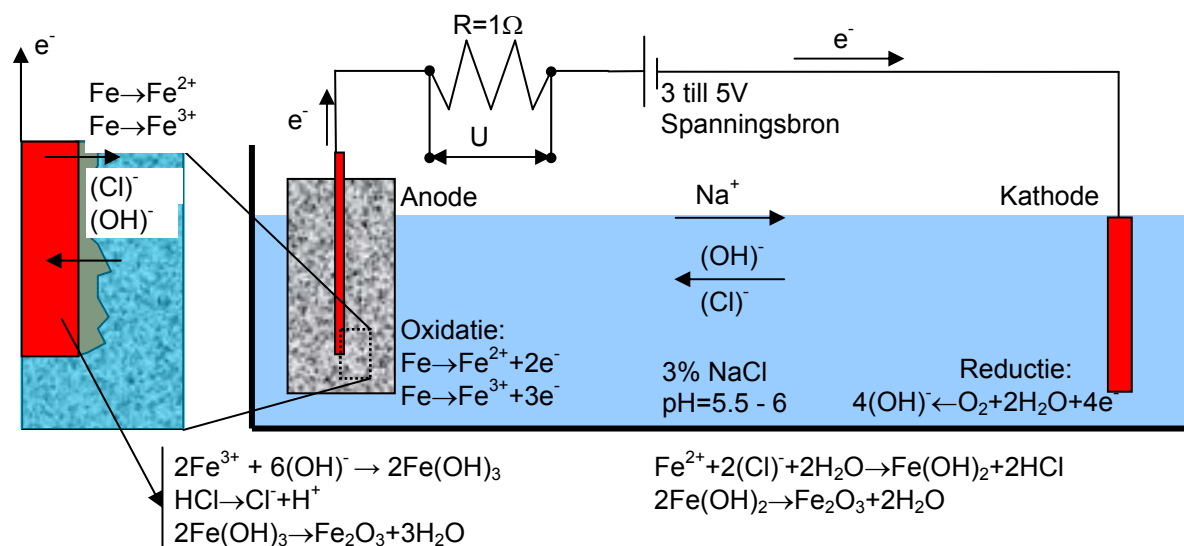
- alkali-aggregaat reactie;
- vorst-dooigedrag;
- indringing van in water opgeloste zouten.

Omdat in principe waterwerende producten niet dampremmend zijn, bieden ze geen bescherming tegen carbonatie door transport van  $\text{CO}_2$  doorheen de betondekking.

Op basis hiervan werden in het verleden enkele producten aan een vergelijkend onderzoek onderworpen. Na behandeling van het oppervlak werden ze gedurende lange tijd ondergedompeld in een waterige natriumchloride oplossing. Nadien werd de indringdiepte van de chloride-ionen gemeten (Figuur 4).



**Figuur 4:** chloridenpenetratie in betonnen kubussen, na onderdompeling in een waterige natriumchloride oplossing [6,7]



**Figuur 5:** proefopstelling – versnelde chloride penetratietest (CPT-test)

Op basis van dit vergelijkend onderzoek bleek duidelijk de doeltreffendheid van in het bijzonder alkyltriethoxysilanen. Mede door de diepe penetratie van silanen wordt een efficiënte barrière tegen chloridenindringing verkregen.

Deze goede performantie wordt bevestigd in versnelde chloride penetratie proeven uitgevoerd op cilindrische proefstukken van 60 mm diameter (Figuur 5). De wapening (12 mm diameter) bevindt zich in het midden van het cilindrisch proefstuk ~~op een hoogte 24 mm~~. De vergelijkende resultaten zijn opgenomen in tabel 1. De aangegeven chloride penetratie tijd (CPT) is de tijd in uren die de chloriden nodig hebben om de wapening te bereiken. De aangegeven tijden tonen bijvoorbeeld aan dat een waterwerende behandeling in een niet volledig verzadigd beton meer effectief is dan het gebruik van een polymeercementbeton met 10% polymeer op cement verhouding.

**Tabel 1:** Chloride penetratie tijd voor verschillende betonnen proefstukken [6,7] (a).

Materiaal	Bewaaromstandigheden	CPT (u)
Referentie	Verzadigd met water	235
+EVA (10%)	Verzadigd met water	178
+EVA (10%)+SCA	Verzadigd met water	227
Dynasylan® BHN	Verzadigd met water	105-106
Dynasylan® BHN	Ondergedompeld in water	>140 (5V)
Dynasylan® BHN	Gedroogd op 105°C	> 800

(a): elektrische spanning: 3V; Bewaring in 3% NaCl-oplossing voorafgaand aan beproeving; Cement P40/cem I; w/c-ratio: 0.50; EVA: Ethyleenvinylacetaat; SCA: Silane Coupling agent

## Toepassingsvoorbeeld – kaaimuur te Zeebrugge

De nieuwe container terminal in de haven van Zeebrugge is gebouwd in 1993. Onmiddellijk na de bouw werd deze gewapend betonnen constructie voorzien van een waterwerende bescherming als een preventieve beschermingsmaatregel. Dit type van structuur is onderhevig aan de chloridenbelasting van de maritieme omgeving, niet alleen onder het niveau van de getijdenwerking, maar tevens in de getijdenzone als bovenop de kaaimuur.

De effectiviteit van de waterwerende behandeling is vooraf bestudeerd in het Laboratorium Reyntjens van K.U.Leuven. Gebaseerd op een experimentele vergelijkende studie, werd in 1993 besloten om Protectosil® BHN (het vroegere Dynasylan® BHN: isobutyltriethoxysilaan) te gebruiken.

Om de effectiviteit van de waterwerende behandeling na te gaan, werden tot op heden 3 opeenvolgende meetcampagnes uitgevoerd: in 1996, 1998 en in 2005, dus na respectievelijk 3, 5 en 12 jaar blootstelling in reële maritieme omgeving aan de Belgische Noordzee kust [8-12].

Tijdens elk van deze meetcampagnes worden kernen geboord op verschillende locaties in de behandelde en niet-behandelde zones. Op basis van deze kernen worden de chloridenprofielen in het beton bepaald. Dit laat toe om de evolutie van de effectiviteit van de waterwerende behandeling in functie van verschillende locaties te bepalen.

Bijkomend worden de verkregen data gebruikt om de chloridenpenetratie in de structuur, waarvoor de 2<sup>de</sup> diffusiewet van Fick wordt gehanteerd, te modelleren. Om rekening te houden met de spreiding op de data wordt een probabilistische procedure gevolgd. De methodologie laat toe om een schatting te maken van de resterende levensduur van de structuur, zowel voor de behandelde als niet-behandelde zone. De methodiek en resultaten worden voorgesteld.

Voor een langdurige en efficiënte bescherming van het beton, is een voldoende diepe indringing in het beton van het waterwerende product noodzakelijk. In labomstandigheden werd een penetratiediepte van 6 tot 9 mm opgetekend. De resultaten van deze voorafgaande proeven zijn weergegeven in Tabel 2. Een behandeling in labo bestond uit een onderdompeling in het

waterwerende product gedurende een periode van 15 seconden. Enkel proefstuk 5 werd gedurende 60 seconden ondergedompeld. Het product verbruik ( $\text{g/m}^2$ ) is eveneens aangegeven.

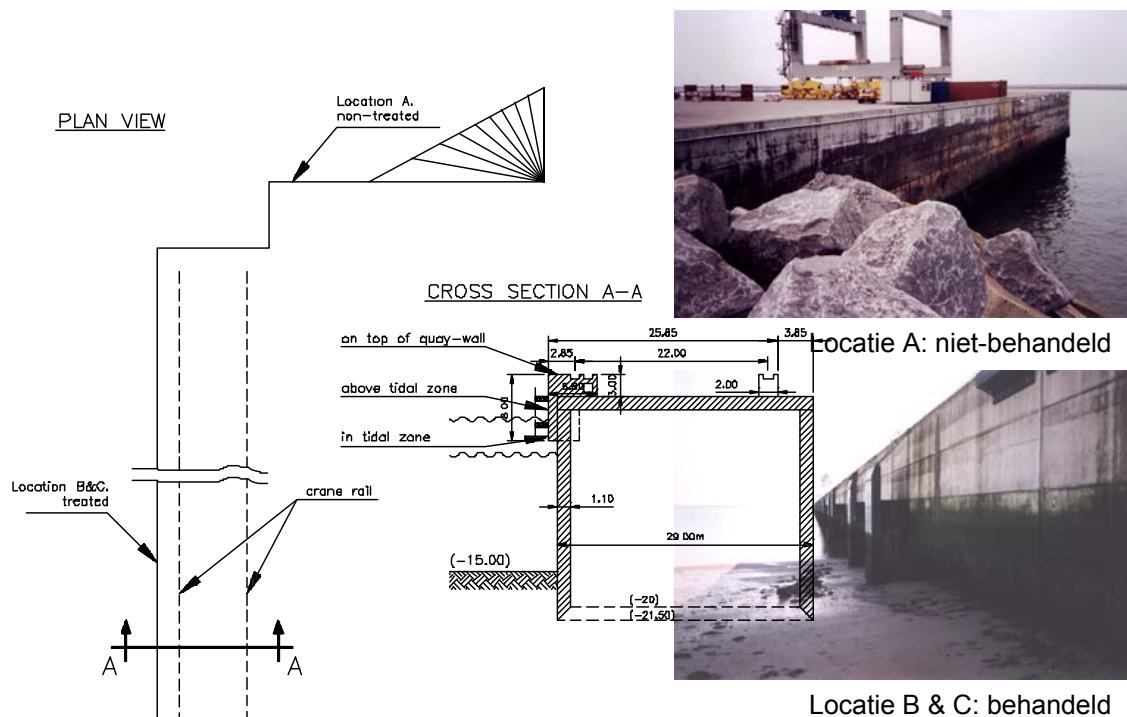
**Tabel 2:** Penetratie diepte en productverbruik als functie van de tijd tussen twee opeenvolgende behandelingen [6]

Staal nr.	Tijdsduur tussen twee behandelingen (dag)	Penetratie diepte (mm)	Tijdsduur onderdompeling van elke behandeling (s)	Verbruik ( $\text{g/m}^2$ )		
				1ste behandeling	2de behandeling	Totaal
1	2	6	2 x 15	138	187	325
2	4	7	2 x 15	169	285	454
3	7	8	2 x 15	89	182	271
4	7	8	2 x 15	102	204	306
5	7	9	2 x 60	156	244	400

Hieruit kan worden afgeleid dat de indringdiepte stijgt naarmate de tijd tussen opeenvolgende behandelingen toeneemt. Deze tendens wordt niet teruggevonden voor het verbruik aan waterwerend middel. Langere onderdompeling veroorzaakt enkel een lichte verhoging in de impregnatiediepte.

### Kaaimuur te Zeebrugge – achtergrond en in situ meetcampagne

Figuur 6 illustreert de kaaimuur die werd opgetrokken op afgezonken funderingen (caissons). Op basis van het aangegeven vooronderzoek in labo, werd als hydrofobeermiddel een hooggeconcentreerde solventvrije formulatie gebaseerd op iso-butyltriethoxysilaan geselecteerd. Bedoeling is het preventief vermijden van schade veroorzaakt door chloriden indringing, putcorrosie en alkali-aggregaat-reactie [1].



**Figuur 6:** Planzicht (links) en dwarsdoorsnede (midden) van de kaaimuur te Zeebrugge. De rechter foto's illustreren de niet behandelde (boven) en behandelde zone (onder).



Op de werf werd volgend applicatieschema gehanteerd, gebaseerd op de voorafgaande resultaten verkregen in het laboratorium:

- Een eerste applicatie van het waterwerend product onmiddellijk na het ontkisten. Dit voorkomt de droging van het oppervlak alsook een eventuele initiële indringing van zeewater;
- Een tweede applicatie na 7 dagen, om een diepe productpenetratie in het beton te bewerkstelligen.

Het waterwerend product werd aangebracht door airless versproeien op lage druk met behulp van een plunjerpomp (Figuur 7). Het verbruik werd globaal geraamd op 0.35 liter per m<sup>2</sup> (300 g/m<sup>2</sup>), wat goed overeenkomt met het verbruik dat in labo werd vooropgesteld om een voldoende indringing in het beton te kunnen garanderen, noodzakelijk voor een duurzame bescherming (zie Tabel 2).

Om de effectiviteit van deze waterwerende behandeling te beoordelen, werden tot op heden 3 meetcampagnes uitgevoerd, respectievelijk na 3, 5 en 12 jaar blootstelling. De effectiviteit kan mede objectief beoordeeld worden omdat een gedeelte van de kaaimuur niet werd behandeld met een waterwerend product (locatie A, Figuur 6).

De vergelijkende studie bevat resultaten van verschillende zones:

- Niet-behandeld – in getijdenzone (locatie A);
- Niet-behandeld – boven getijdenzone (locatie A);
- Behandeld – in getijdenzone (locatie B);
- Behandeld – boven getijdenzone (locatie B);
- Behandeld – bovenop de kaaimuur (locatie C).

Daarmee gaat de aandacht naar de effectiviteit van de behandeling (onderlinge vergelijking tussen locatie A en B) alsook naar het verschil dat wordt opgetekend onder verschillende belasting (locatie A, B en C).



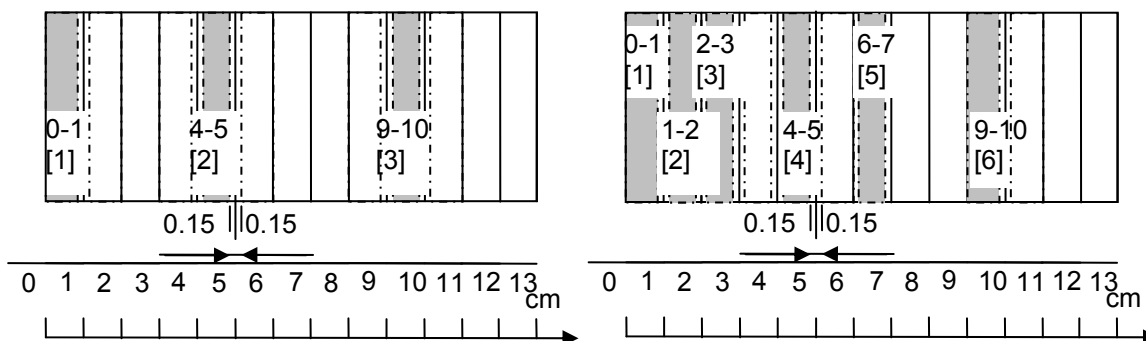
**Figuur 7:** Airless versproeien op lage druk van het waterwerend product met behulp van een plunjerpomp

## Monitoring campagne

Tijdens de opeenvolgende meetcampagnes werden betonnen kernen geboord (diameter = 50mm) telkens op de verschillende locaties. Volgende technieken werden gebruikt als basis voor de beoordeling van de efficiëntie:

- Visuele bepaling van de penetratiediepte van het hydrofoberingsproduct na bevochtiging van een vers gebroken betonoppervlak;
- Opmeting van de betondekking;
- Meting van de carbonatatiediepte onmiddellijk na het uitboren van de kernen alsook de dag erna voor een objectieve vergelijking;

- Chemische analyse ter bepaling van:
  - Het cementgehalte;
  - Het water- en zuuroplosbaar chloridengehalte op verschillende dieptes (3 of 6 dieptes, zie figuur 10-14) ten opzichte van het buitenoppervlak om zo het profiel van de chloridenpenetratie te kunnen samenstellen. Daartoe worden de kernen in schijfjes verzaagd, zoals aangegeven in figuur 8.



**Figuur 8:** Bepalen van de chloridenconcentratie op verschillende dieptes ten opzichte van het betonoppervlak: 3 dieptes (links), 6 dieptes (rechts)

### Penetratie diepte – hydrofoob – hydrofiel gedrag

De betonschijfjes hebben over het algemeen een dikte van 7 tot 9 mm, steeds voldoende om de penetratiediepte visueel vast te stellen. De overgang tussen hydrofoob en hydrofiel gedrag is veelal duidelijk visueel waarneembaar (Figuur 9). De absorptie van water in het hydrofiel deel geeft een duidelijke verkleuring op het breukvlak. De gemeten waarden variëren van 1 tot 6 mm (gemiddelde waarde: 3,5mm). De resultaten zijn in Tabel 3 samengevat. Alle proefstukken bevatten een significante concentratie alkyltriethoxysilaan op 2 mm diepte. Zelfs op een diepte van 8 mm wordt het waterwerend middel gedetecteerd in de onderzochte monsters. Gebaseerd op de visuele inspectie kan men aldus afleiden dat, zelfs na 12 jaar, een hydrofobe werking waarneembaar blijft.

**Tabel 3:** Penetratiediepte van en concentratie aan alkyltriethoxysilaan van verschillende gelichte boorkernen

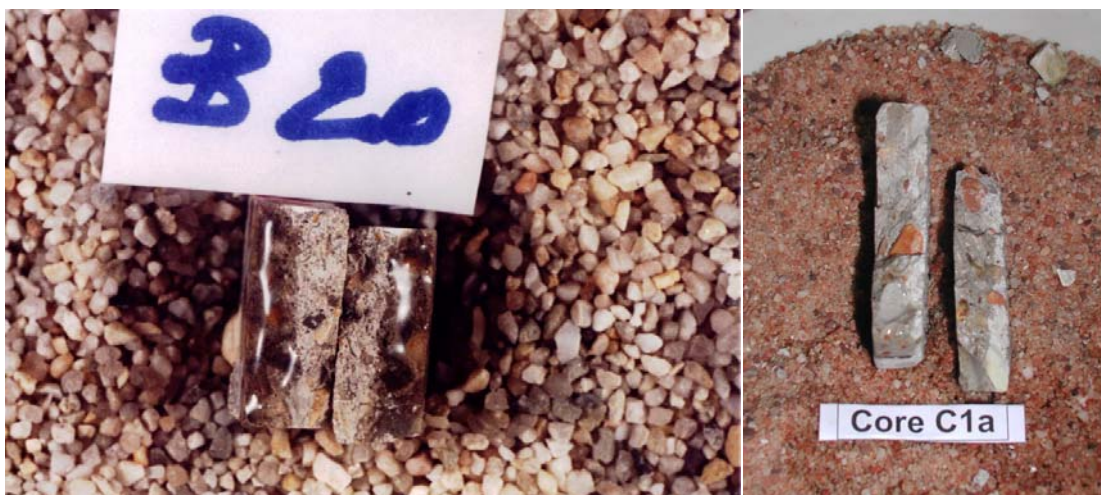
Locatie	Penetratiediepte (mm)		Concentratie alkyltriethoxysilaan (%w/cem) <sup>(a)</sup> in functie van de penetratiediepte 0mm 2mm 4mm 6mm 8mm
	2005	1998	1998
B : boven getijdenzone	4-6	2-6	0,14 / 0,20 / 0,08 / 0,02 / 0,00 0,13 / 0,14 / 0,16 / 0,17 / 0,06 0,07 0,18 0,19
B : in getijdenzone	5-6	3-5	0,12 0,04
C : bovenop kaaimuur	1-2	1-3	0,15 0,29

(a): bepaald dmv pyrolyse gaschromatografie – patent EP 0 741 293 [13]

### Carbonatatiediepte

De carbonatatiediepte wordt bepaald door het vers gezaagde oppervlak met een phenolftaleïne oplossing (1% oplossing in ethylalcohol) te besproeien. De resultaten zijn in tabel 4 weergegeven. De carbonatatiediepte is nagenoeg onbestaande voor de niet-behandelde locaties. In de

behandelde zones varieert de carbonatatie diepte van 4-6 mm in de getijdenzone, tot 8-12 mm boven de getijdenzone (spatwater) en 12-16 mm bovenop de kaaimuur (contact met zeelucht). Wanneer de verschillende locaties onderling met elkaar worden vergeleken, is het duidelijk dat de diffusie van CO<sub>2</sub> in het beton versterkt wordt door de waterwerende behandeling. De toegang voor CO<sub>2</sub> wordt verhoogd doordat de waterbarrière in belangrijke mate wegvalt door de waterwerende behandeling.



**Figuur 9:** Voorbeeld van visuele vaststelling van de hydrofobe werking door middel van het bevochtigen van beide kanten van een vers gebroken oppervlak (dikte van het schijfje 7 mm) – kern B2 (links:1998) en kern C1 (rechts:2005)

**Tabel 4:** Carbonatatie diepte van beton in niet-behandelde en behandelde zones

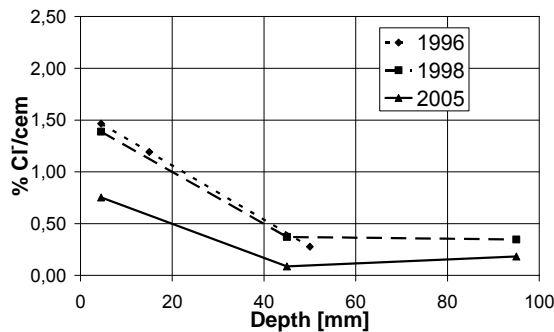
Locatie	Carbonatatie diepte [mm]		
	2005	1998	1996
A: niet-behandeld			
Boven getijdenzone	0	0-0.5	0
In getijdenzone	0	0	1
B en C: behandeld met Protectosil® BH N			
Boven getijdenzone	8-12	6-12	4
In getijdenzone	4-6	5-10	5
Bovenop kaaimuur	12-16	5-10	5

### Chemische analyse - water oplosbaar chloride gehalte

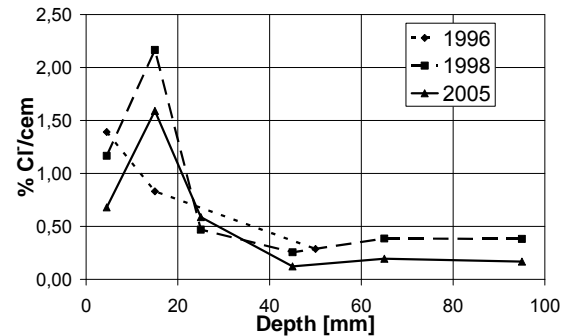
Op basis van de chemische analyse wordt de chemische samenstelling (NBN B15-250:1990) van het beton bepaald, waaruit het meest waarschijnlijke cementgehalte kan worden afgeleid. Daarnaast worden twee verschillende chloride concentraties bepaald: het wateroplosbare en het zuuroplosbare chloridgehalte.

Om de chloride profielen op te stellen, worden de kernen in schijfjes gezaagd met een gemiddelde dikte van 7-9 mm (Figuur 8) waarvan de concentratie aan chloriden wordt bepaald. Het wateroplosbaar chloride gehalte is gelijk aan het gehalte aan vrije chloriden en een groot deel van de chloriden, gebonden onder de vorm van het Friedelzout (C<sub>3</sub>A.CaCl<sub>2</sub>.10H<sub>2</sub>O) dat in water wordt opgelost gedurende de extractie. Omdat het juist deze wateroplosbare chloriden zijn die het risico op corrosie inhouden, worden enkel deze resultaten hier aangegeven. De resultaten worden weergegeven in de figuren 10-14, telkens voor de eerder aangegeven 5 locaties, in functie van de diepte ten opzichte van het betonoppervlak en in functie van de tijd (1996, 1998, 2005) waarop de analyse is uitgevoerd. Elke waarde, aangegeven in de figuren, is het gemiddelde van 3 chemische analyses uitgevoerd op naburig geboorde kernen.

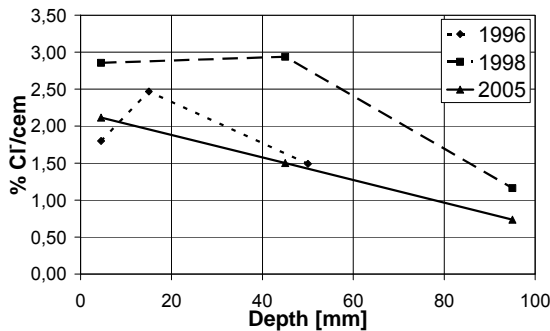
Met betrekking tot de weergegeven resultaten zijn enkele bemerkingen over de nauwkeurigheid van de resultaten vermeld. De data vertonen een belangrijke spreiding. Deze wordt mede veroorzaakt door de heterogeniteit van het beton (samengesteld uit aggregaten en cement) in relatie tot de relatief kleine schaal van de geboorde kernen ( $d=50\text{mm}$ ) en de gemiddelde dikte van de schijfjes (7-9mm). De variatie in de resultaten wordt mede veroorzaakt door het aantal en de grootte van de aggregaten binnen het geanalyseerde monster. De variatie van de blootstelling is een belangrijke bijkomende factor van onzekerheid (algen, spatwater, verhoogde carbonatatie diepte).



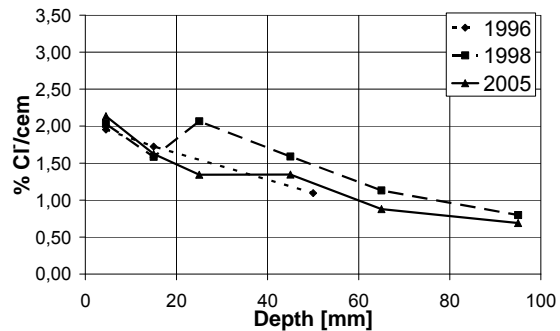
**Figuur 10:** wateroplosbaar chloride gehalte, locatie A, niet behandeld, boven de getijdenzone (1996, 1998 en 2005)



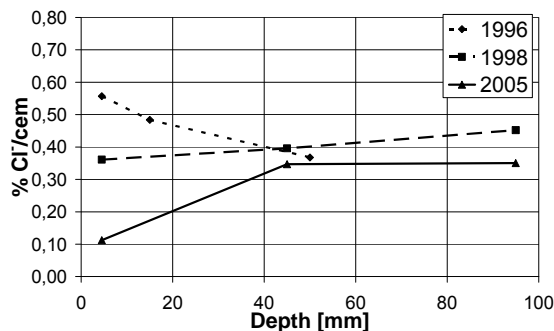
**Figuur 11:** wateroplosbaar chloride gehalte, locatie A, niet behandeld, in de getijdenzone (1996, 1998 en 2005)



**Figuur 12:** wateroplosbaar chloride gehalte, locatie B, behandeld, boven de getijdenzone (1996, 1998 en 2005)



**Figuur 13:** wateroplosbaar chloride gehalte, locatie B, behandeld, in de getijdenzone (1996, 1998 en 2005)



**Figuur 14:** wateroplosbaar chloride gehalte, locatie C, behandeld, bovenop de kaaimuur (1996-1998-2005);

Vanuit deze chloride profielen kunnen volgende besluiten getrokken worden:

- Het wateroplosbaar chloride gehalte in de niet-behandelde zone bereikt hoge waarden die variëren van 2.9%Cl<sup>-</sup>/cem tot 0.90%Cl<sup>-</sup>/cem op een diepte van 95 mm. De afwezigheid van een effectieve barrière, gecombineerd met een relatief hoge porositeit (15.6-16.2 vol%), hebben er toe geleid dat de chloorionen al diep tot in het beton zijn doorgedrongen.
- De corresponderende wateroplosbaar chloride concentraties in het behandeld deel (B) in de getijdenzone zijn significant lager.
- Blootstelling aan het effect van de getijden en aan spatwater veroorzaakt de grootste chloride belasting. Het onderlinge verschil is beperkt. De chloorionen belasting bovenop de kaaimuur, door zeelucht en verder verwijderd van directe blootstelling, is duidelijk veel lager.
- Klaarblijkelijk wordt een opstapeling van chloorionen opgemeten in de behandelde zone (B) in de getijdenzone op een gemiddelde diepte van ongeveer 15 mm (Figuur 13). Initieel, 1996 – na 3 jaar blootstelling – werd deze niet vastgesteld. Ook in de literatuur wordt melding gemaakt van een opstapeling van chloridenionen achter de waterwerende laag [14], mede veroorzaakt door opeenvolgende nat-droogcycli in de getijdenzone. Deze buffering van chloorionen is niet aanwezig in de niet-behandelde zone (Figuur 11). Echter blijkt deze piekwaarde van chloriden op een diepte van 15 mm niet te leiden tot een verhoogde waarde op grotere diepte. Op 25 mm diepte worden chloridenconcentraties bereikt die verwacht worden op deze diepte zonder intermediaire piekwaarde.

### Levensduur voorspelling – Diffusie coëfficiënt als toevalsvariabele

Gebaseerd op de opgemeten materiaaleigenschappen en chloridenprofielen, kan een levensduurvoorspelling worden uitgevoerd, gebruik makend van een tijdsafhankelijke betrouwbaarheidsanalyse [15-22]. Het is belangrijk aan te geven dat dit type van analyse kan worden uitgevoerd voor eender welk schademechanisme, zolang de materiaaldata beschikbaar zijn en de mathematische formulering van de faalmode – grenstoestandsfunctie – voorhanden is. In deze analyse is de faalmode het einde van de initiatieperiode. Dit komt overeen met het punt 1 op de figuur 2.

Zelfs al wordt enkel de initiatieperiode beschreven, dan nog bevat de uitgevoerde analyse behoorlijk wat vereenvoudigingen. Om het transport van chloriden doorheen het beton te modelleren, wordt aangenomen dat de 2<sup>de</sup> wet van Fick toepasbaar is. Eigenlijk is deze enkel van toepassing voor zuiver diffusiegestuurde transportprocessen. Dit betekent voor het beton dat capillaire krachten van lege poriën verwaarloosd worden en dus wordt uitgegaan van verzadigde poriën. Daarnaast wordt aangenomen dat het materiaal homogeen en isotroop is, en bovendien dat het beton niet-reactief is.

Ondanks de belangrijke verschillen tussen de toepasbaarheid van de 2<sup>de</sup> wet van Fick en de realiteit, wordt ze nog steeds vaak gebruikt als model om het chloridentransport in het beton te beschrijven. Natuurlijk kan een vergelijkbare analyse steeds worden uitgevoerd wanneer een meer nauwkeurig transportmodel beschikbaar is. Daarenboven gelden deze beperkingen voor eender welke analyse waarbij gebruik wordt gemaakt van dit transportmodel en is het dus niet enkel een beperking van een probabilistische analyse.

De diffusiewet, 2<sup>de</sup> wet van Fick, voor ééndimensionaal transport heeft volgende vorm:

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left( D \frac{\delta C}{\delta x} \right) \quad (3)$$

Wanneer kan worden aangenomen dat er geen scheikundige reacties voorkomen tussen beton en chloriden, kan een expliciete oplossing voor deze differentiaalvergelijking worden uitgewerkt, gebruik makend van volgende randvoorwaarden:

- $C(x,t=0) = C_0$ ;  $0 < x < \infty$  (de initiële chloridenconcentratie in het betonmengsel) en
- $C(x=0,t) = C_S$ ;  $0 < t < \infty$  (de chloridenconcentratie belasting op het betonoppervlak ten gevolge van de maritieme omgeving),

$$C_i(x,t) = C_0 + (C_S - C_0) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (4)$$

Waarin  $C_i(x,t)$  het chloridgehalte voorstelt op tijdstip  $t$ , op een afstand  $x$  van het betonoppervlak en  $\operatorname{erfc}()$  is de error-functie.

Een betrouwbaarheidsanalyse voorziet in een methode om de faalkans van een structurele component te begroten. Deze component is een structuur of een onderdeel van een structuur waarvan de faalmode wordt geschreven door een grenstoestandsfunctie [17]. In deze analyse, waarin enkel de diffusiecoëfficiënt als toevalsvariabele wordt gedefinieerd, kan de grenstoestandsfunctie  $g(D)$  beschreven worden als:

$$g(D) = C_T - C(D) \quad (5)$$

waarin  $C_T$  de grenswaarde is voor de chloridenconcentratie en  $C(D)$  de chloridenconcentratie voorstelt op een afstand  $x$  vanaf het blootgestelde oppervlak op een tijdstip  $t$ . Met de cumulatieve waarschijnlijkheidsverdeling van de diffusiecoëfficiënt ( $D$ ) voor chloorionen, kan de kans dat de grenstoestandsfunctie overschreden wordt expliciet berekend worden [16]:

$$P_f = P(C > C_T) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(D_T) - \lambda_D}{\xi_D}\right) \quad (6)$$

Waarin  $\lambda_D$  en  $\xi_D$  de parameters zijn van de lognormaal verdeeld veronderstelde diffusiecoëfficiënt en waarin  $\Phi(D)$  de cumulatieve standaard normaal verdeling is. De parameters  $\lambda_D$  en  $\xi_D$  worden berekend uit de experimenteel opgemeten chloridenprofielen. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van volgende randvoorwaarden:  $C_0 = 0.03\% \text{Cl}^-$ ,  $C_S = 7\% \text{Cl}^-/\text{H}_2\text{O}$  en  $C_T = 0.7\% \text{Cl}^-/\text{cem}$ .

Tabel 5 geeft de gemiddelde waarde  $\mu(D)$  en de standaarddeviatie  $\sigma(D)$  weer van de diffusiecoëfficiënt ( $D$ ) voor de 3 opeenvolgende meetcampagnes: 1996, 1998 and 2005. De voorspelde levensduur  $t_L$  is aangegeven voor een faalkans gelijk aan  $p_f = 0.5$  dat de grenswaarde  $C_T$  wordt overschreden ter hoogte van de wapening, die zich op een diepte gelijk aan  $x=12\text{cm}$  van de betonoppervlakte bevindt. De hoofdwapening bevindt zich op deze diepte. Dit uitgaande van de aanvang van blootstelling van het oppervlak in 1993.

Merk op dat na deze periode de structuur niet zal bezwijken. De levensduurvoorspelling heeft enkel betrekking op de initiatieperiode, de periode nodig voor de chloridenionen om de wapening te bereiken en aldaar een chloridenconcentratie gelijk aan  $0.7\% \text{Cl}^-/\text{cem}$  op te bouwen.

Ondanks alle aangenomen vereenvoudigingen in de analyse is het opvallend dat de diffusiecoëfficiënt voor chloorionen nagenoeg een orde grootte groter is voor de niet-behandelde zone in vergelijking tot de behandelde zone wat zich onmiddellijk vertaalt in de veel beperktere levensduur.

**Tabel 5:** Diffusiecoëfficiënt D – parameters van lognormaal verdeelde toevalsvariabele en voorspelde levensduur op basis van informatie uit meetcampagnes na 3, 5 en 12 jaar natuurlijke blootstelling.

Locatie	Gebaseerd op meetcampagnes: 1996, 1998 en 2005		
	$\mu(D)$ [cm <sup>2</sup> /s]x10 <sup>-8</sup>	$\sigma(D)$ [cm <sup>2</sup> /s]x10 <sup>-8</sup>	Service life [y] C <sub>T</sub> = 0.7 % Cl/cem
A (niet-behandeld)	9.58	10.55	16.5
B (behandeld)	1.61	2.49	107
C (behandeld bovenop de kaaimuur)	2.13	3.46	91

## Conclusies

Het aantal in België gelegen (gewapend) betonnen monumenten stijgt systematisch. Momenteel ligt de nadruk bij het herstel van beton voornamelijk op grote gewapend betonnen infrastructuur die 30-50 jaar geleden werd opgetrokken en waar schade zich manifesteert. De technieken zijn dan ook voorhanden om deze schade-evolutie op een gepaste wijze op te volgen en preventief op te treden in het behoud ervan. Naar de toekomst toe zullen steeds meer van deze technieken doordringen naar de gebouwen die we nu stelselmatig opnemen in de lijst van historische monumenten.

In deze bijdrage werd uitgaande van de meest frequent voorkomende schadefenomenen gepeild naar de achterliggende transportmodellen. Daarna werd ingegaan op de werkingsmechanismen van waterwerende behandelingen. De nadruk ligt vooral op de impact die deze technieken hebben op het (preventief) behoud van de structuur.

Het voorbeeld van de kaaimuur te Zeebrugge (1993) - spitst zich toe op corrosie van het beton in maritieme omgeving en het nut van een preventieve bescherming met een hydrofoberingsmiddel. Uit dit voorbeeld kan met behulp van een regelmatige opvolging van de chloride profielen een duidelijk beeld geschetst worden van de evolutie van chloride penetratie. In extensie kan met behulp van een transportmodel het einde van de initiatieperiode gekwantificeerd worden. De effectiviteit van de preventieve behandeling kan zo beoordeeld worden [23-24].

Daar waar de waterwerende behandeling na 13 jaar maritieme blootstelling duidelijk effectief blijft om de indringing van chloriden te reduceren, heeft de behandeling geen gunstig effect op de carbonatatie van het beton. Dit jaar wordt opnieuw een in situ campagne gepland om de effectiviteit na 17 jaar blootstelling op te volgen.

## Referenties

1. Van Gemert D, Schueremans L. Preventieve bescherming van gewapend betonstructuren tegen chloriden-indringing: Evaluatie op container-terminal Zeebrugge”, Infrastructuur in het Leefmilieu, 1997, pp. 93-100.
2. Figeys W., Schueremans L., Brosens K., Van Gemert D., Ignoul S., “Verjongingskuur voor historische monumenten”, in: Het Ingenieursblad, 2006, nr. 2006, pg. 24-30.
3. TV 231, “Betonherstelling”, WTCB Wetenschappelijk en Technologisch Centrum voor de Bouwnijverheid, 2007.
4. Poupeleer Anne-Séverine, "Transport and crystallization of dissolved salts in cracked porous building materials", PhD Thesis, K.U.Leuven, 2007.
5. TV224, “Waterwerende oppervlaktebehandeling”, WTCB Wetenschappelijk en Technologisch Centrum voor de Bouwnijverheid, juni 2002.
6. Van Gemert D. Betonbescherming tegen chloridenindringing. De Bouwkroniek, 1992; 11: 8-10.

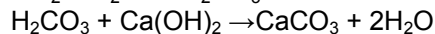
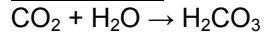
7. Van Tongelen J, Van Gemert D, Fremout J. Preventieve bescherming van de nieuwe containerterminal te Zeebrugge tegen de schadelijke invloed van chloride-ionen. De Bouwkroniek, 1994; 4: 30-35.
8. Schueremans L, Van Gemert D. Performantie IBTEO voor remming chloridenpenetratie. internal Report, PV28521, KULeuven, 1996.
9. Schueremans L, Van Gemert D. Sivento  $\text{Cl}^-$ -Zeebrugge. internal Report, PV29143, KULeuven, 1998.
10. Schueremans L, Van Gemert D. In site survey of chloride penetration in a quay-wall at Zeebrugge (B) Harbor containing Protectosil® BH N. internal Report, PV30366, KULeuven, 2005.
11. Schueremans L, Van Gemert D., Giessler S. "Chloride penetration in RC-structures in marine environment – long term assessment of a preventive hydrophobic treatment", Construction and Building Materials, Construction and Building Materials, Volume 21, Issue 6, June 2007, Pages 1238-1249.
12. Schueremans L., Van Gemert D., Friedel M. and Giessler-Blank S., "Durability of water repellents applied in marine environment", Hydrophobe V, Brussels, April 15-16, 2008, pp. 357-367.
13. Herrmann C, Rotzsche H. Determining Silanes in Inorganic Matrices by Pyrolysis – GC. International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials, Hydrophobe II, 1998, p.231 – 236.
14. McPolin D, Basheer PAM, Long AE, Grattan KTV, Sun T. Obtaining progressive chloride profiles in cementitious materials. Construction and Building Materials, 2005;19: 666-673.
15. Prezzi M, Geyskens Ph, Monteiro PJM. Reliability approach to service life prediction of concrete exposed to Marine Environment. ACI Materials Journal, 1996;93(6):554-562.
16. Clifton JR. Predicting the service life of concrete. ACI Materials Journal, 1993;90(9):661-671.
17. Melchers RE. Structural reliability: analysis and prediction. John Wiley and Sons, second edition, 1999.
18. Siemes T, Edvardsen C. Duracrete: service life design for concrete structures. 8th international conference on durability of building materials and components, Canada, 1999, p.1343-1356.
19. Costa A, Appleton J. Chloride penetration into concrete in marine environment – Part II: Prediction of long term chloride penetration. Materials and Structures, 1999;32: 354-359.
20. Thoft-Christensen P, Jensen FM, Middleton CR, Blackmore A. Assessment of the reliability of concrete slab bridges. 7th IFIP WG7.5, Working Conference, Colorado, USA, 1996.
21. Diamantidis, "Koordinaten und Entwicklung eines probabilistischen Sicherheitskonzepts für neue und bestehende Tragwerke", T2881, Fraunhofer IRB Verlag, 1999.
22. Vrouwenvelder, "Development towards full probabilistic design code, Structural Safety, Vol 24, 2002, pp. 417-432
23. Schueremans L., "Monitoring van gebouwd erfgoed", Eindsymposium van het Europees Interreg IIIA-project, 28/05/2008, Thorn, Nederland. pp. 1-17.



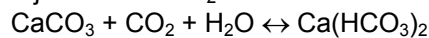
24. Luc Schueremans (Be), "Kaaimuur te Zeebrugge - impact van monitoring en preventieve ingrepen op het behoud", WTA-NI-VI studiedag "Beton Behouden: Theorie in de praktijk gezet", 14/11/2008, 2008, ISBN/EAN: 978-90-79216-03-1, pp. 45-62.

## Bijlage

### Carbonatatie



Bij overmaat  $\text{CO}_2$ :



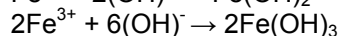
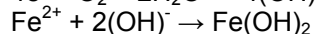
Bij volledige carbonatatie zal zich een  $\text{CaCO}_3/\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  evenwicht instellen waarbij de pH daalt tot 8,3. Het wateroplosbaar  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  kan aanleiding geven tot erosie van het betonoppervlak.

### Corrosie

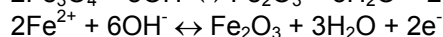
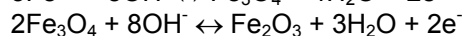
Een corrosieëlement bestaat uit een cathode en een anode waaraan volgende reacties plaatsvinden:

Anode :  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$  (ijzer in oplossing)

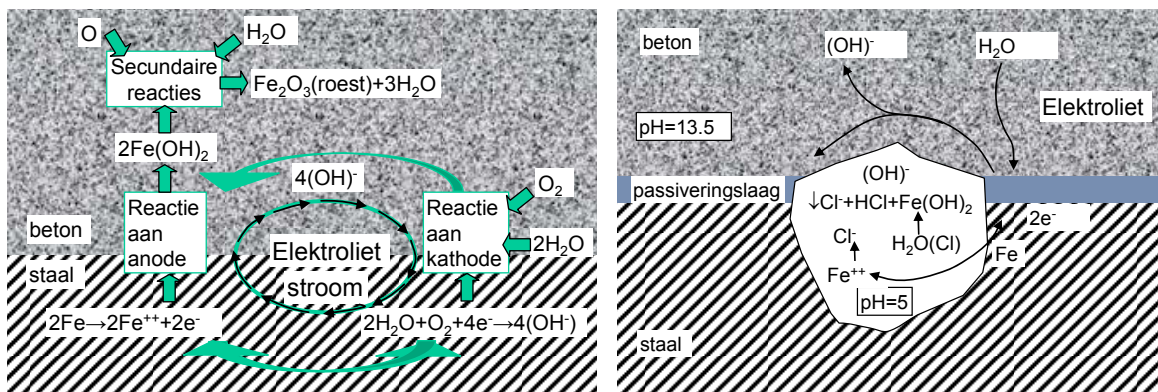
Kathode :  $4\text{e}^- + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4(\text{OH})^-$



Verder:  $3\text{Fe}^{2+} + 8\text{OH}^- \leftrightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$



Bij overmaat  $\text{Cl}^-$  : Vorming van Friedelzout in beton

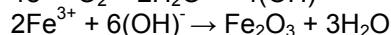


**Figuur:** schematische voorstelling van wapeningscorrosie (links) en putcorrosie (rechts) van wapening in beton

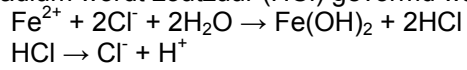
### Putcorrosie (in aanwezigheid van chloorionen)

Anode :  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$  (ijzer in oplossing)

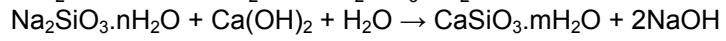
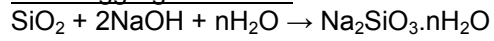
kathode :  $4\text{e}^- + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4(\text{OH})^-$



In een tussenstadium wordt zoutzuur (HCl) gevormd waardoor de pH plaatselijk daalt tot 5:



Alkali-aggregaat-reactie



Het product  $\text{CaSiO}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$  is een gel met expansieve eigenschappen